

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 538.911

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-651-660>

Оригинальная статья

Получение быстрым джоулевым нагревом углеродных графенсодержащих порошков и их применение в качестве модификаторов для стекловолокна

А. Р. Прокопьев^{✉,1,2}, Е. Д. Васильева^{1,2}, Н. Н. Лоскин^{1,2}, Д. Н. Попов^{1,2}

¹Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация

²Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉ aisenprokopiev@mail.ru

Аннотация

В работе представлено получение углеродных порошков, содержащих графеновые чешуйки. Синтез проводился методом быстрого джоулевого нагрева смеси мелкодисперсного порошка полипропилена и технического углерода при соотношении 1:1. Для проведения процесса разработан и сконструирован экспериментальный макет установки, основой которого являются конденсаторный блок с общей емкостью 32 мФ и индуктор номиналом 24 мГн. Расчетная температура синтеза составила до 2200 °С при длительности около 32 мс. Для использования в качестве пропитывающего состава для стекловолокна был приготовлен раствор, включающий коллоидную дисперсию эпоксидной смолы, аминный отвердитель в смеси деионизированной воды и этилового спирта в отношениях 4 : 0,6 : 10 и 1 масс. % полученного углеродного порошка и технического углерода. Из исследований спектров комбинационного рассеяния света и оптической плотности в УФ-диапазоне следует, что синтезированные углеродные порошки содержат графеновые чешуйки с латеральными размерами до 13 нм. Элементный анализ показывает, что в пропитанном волокне наблюдается значительное повышение содержания атомов углерода по сравнению с исходным стекловолокном. Электрические измерения температурных зависимостей вольт-амперных характеристик показали наличие электропроводности при низких температурах, соответствующей сопротивлению до 8 МОм/кв. В перспективе, электрическая проводимость может быть повышена за счет повышения мощности разряда. Разработанный макет установки для проведения быстрого джоулевого нагрева обладает потенциалом внедрения в область рациональной переработки пластиковых отходов. Полученные углеродные порошки могут выступать в качестве модифицирующих добавок для стекловолокна, используемых для создания стеклофибробетонов.

Ключевые слова: быстрый джоулев нагрев, графеновые чешуйки, модификация поверхности стекловолокна, спектроскопия комбинационного рассеяния света, переработка пластиковых отходов

Финансирование. Работа выполнена за счет финансирования в рамках комплексных научных исследований по теме «Разработка и исследование технологии переработки пластиковых и биологических отходов в графенсодержащий продукт методом джоулевого нагрева для применения в области упрочняющих добавок конструкционных материалов в зонах Арктики и Субарктики Республики Саха (Якутия)», ГК № 8613 и в рамках проекта FSRG-2022-0011.

Благодарности. Организации за финансовую поддержку; рецензенту за рекомендации, коллегам за оказанную помощь.

Для цитирования: Прокопьев А.Р., Васильева Е.Д., Лоскин Н.Н., Попов Д.Н. Получение быстрым джоулевым нагревом углеродных графенсодержащих порошков и их применение в качестве модификаторов для стекловолокна. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):651–660. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-651-660>

Production of graphene-containing carbon powders via fast Joule heating for fiberglass modification

Aisen R. Prokopenv^{✉,1,2}, Elena D. Vasilieva^{1,2}, Nikolay N. Loskin^{1,2}, Dmitrii N. Popov^{1,2}

¹Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

²Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉aisenprokopenv@mail.ru

Abstract

The present study outlines the synthesis of carbon that include graphene flakes. The production process employed rapid Joule heating of a mixture consisting of finely dispersed polypropylene powder and carbon black in a 1:1 ratio. An experimental model of the installation was developed and constructed, based on a capacitor bank with a total capacitance of 32 mF and an inductor with a nominal value of 24 mH for production purposes. A solution was prepared that included a colloidal dispersion of epoxy resins, an amine hardener in a mixture of deionized water and ethyl alcohol in a ratio of 4:0.6:10, along with 1 wt. % of the resulting carbon powder and carbon black, to be used as an impregnating compound for glass fibers. The estimated synthesis temperature reached up to 2200 °C, with a duration of approximately 32 ms. Studies of Raman spectra and optical density in the UV range indicate that the synthesized carbon powders contain graphene flakes with lateral dimensions of up to 13 nm. The results of elemental analysis reveal a significant increase in the carbon atom content in the impregnated fiber compared to the original glass fiber. Electrical measurements of the temperature dependence of the current-voltage (C-V) characteristics demonstrated the presence of electrical conductivity at low temperatures, corresponding to a resistance of up to 8 MΩ/sq. In the future, electrical conductivity may be enhanced by increasing the discharge power. The developed configuration for fast Joule heating has the potential to be integrated into the field of efficient recycling of plastic waste. The resulting carbon powders can serve as modifying additives for glass fiber used in the production of fiberglass concretes.

Keywords: fast Joule heating, graphene flakes, modification of the glass fiber surface, Raman spectroscopy, recycling of plastic waste

Funding. This study was supported as part of a comprehensive scientific research on the theme “The development and research of technology for processing plastic and biological waste into graphene-containing products via Joule heating aimed at producing reinforcing additives of structural materials in the Arctic and Subarctic zones of the Republic of Sakha (Yakutia)”, GC No. 8613 and project No. FSRG-2022-0011.

Acknowledgements. We would like to extend our sincere gratitude to the reviewer, as well as to the various individuals and organizations that have contributed to this work.

For citation: Prokopenv A.R., Vasilieva E.D., Loskin N.N., Popov D.N. Production of graphene-containing carbon powders via fast Joule heating for fiberglass modification. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):651–660. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-651-660>

Введение

Графен сочетает в себе уникальные электрические, оптические и механические свойства, которые, в перспективе, позволяют применять данную структуру во многих приложениях, от текстильной до строительной промышленности [1]. Наноструктура графена представляет собой идеальную гексагональную решетку атомов углерода в состоянии sp^2 -гибридизации. В настоящее время наиболее эффективным методом получения графена толщиной в 1 атом остается механический способ расщепления графита, предложенный в работах А. Гейма и К. Новоселова [2]. В связи с этим интерес представляет использование материалов с графеноподобной структурой, близких по свойствам графену. Углеродные фазы

в таких материалах могут находиться в состояниях различной степени sp^n -гибридизации, что оказывает влияние на конечные физические и химические свойства [3]. Достоинства, а также недостатки производства графеноподобных материалов стимулируют исследователей постоянно искать новые способы и методы быстрого, количественного и в то же время качественного синтеза [4]. Одним из таких перспективных методов является способ получения из пластиковых отходов турбостратного графена методом быстрого джоулевого нагрева [5]. Полученный углеродный порошок был назван «флеш»-графеном благодаря быстрому протеканию процесса (<100 мкс). «Флеш»-графен представляет собой упорядоченные агломерированные листы sp^2 -доменов [5]

с содержанием в общей структуре атомы углерода в состоянии sp^3 -гибридизации за счет вклада аморфного углерода (а:С). По структуре и свойствам углеродный порошок сопоставим с дефектным графеном, который получается масштабируемыми методами (CVD, PECVD, химическое восстановление оксида графена и др.) [6–8].

Углеродные наноматериалы, содержащие в себе как графитовую, так и аморфную составляющие в различных соотношениях, представляют интерес благодаря возможности контролирования структуры и физико-химических свойств материала. Пластиковые материалы в основном состоят из аморфного углерода в различных конфигурациях. Переходы аморфного углерода в графитизированное состояние на данный момент исследовано достаточно обширно [9]. Траектория процесса аморфизация–графитизация была подробно рассмотрена еще в 1999 г. в работах Феррари и Робертсона [10, 11] и служит основой объяснения механизма кристаллизации а:С. Однако переходные процессы, происходящие в результате быстрого джоулевого нагрева в углеродных прекурсорах, в настоящее время изучены недостаточно.

Химическая модификация полимерных материалов графеноподобными материалами является перспективным направлением практического применения, благодаря улучшению механических свойств (прочность, гибкость, истираемость и т. д.), повышению электро- и теплопроводности [12–14]. В [13, 14] показано, что введение углеродных нанотрубок способно усилить физические свойства полимерных материалов, а также они могут быть использованы в качестве функциональных добавок в керамике и стекловолокне в различных трибологических приложениях [15, 16]. Среди множества методов функционализации поверхности стекловолокон или тканей разного состава наиболее популярны погружение [17] и напыление [18]. Нанесение покрытия путем погружения стекловолокон в пропитывающий состав является одним из наиболее простых и эффективных методов.

В автомобильной промышленности модифицированные стекловолокна применяются в производстве деталей автомобилей, в авиа- и морском транспорте – для создания легких и устойчивых к коррозии компонентов [19]. В энергетике модифицированное стекловолокно находит применение в производстве ветряных турбин и солнечных панелей для повышения их эффективности и срока службы [20]. Стекловолокна, покрытые

углеродными модификаторами, также могут использоваться в качестве наполнителей строительных композиционных материалов [21].

Таким образом, в работе была поставлена цель – получение углеродных графеносодержащих порошков из бытовых отходов методом быстрого джоулевого нагрева, их исследование и потенциальное применение в качестве модификаторов для стекловолокон. Косвенно поставленная цель решает проблему рациональной переработки пластиковых отходов человеческой жизнедеятельности. Была сформирована методика синтеза углеродных графеносодержащих порошков быстрым джоулевым нагревом, разработан макет установки для проведения синтеза, исследованы полученные материалы, а также обосновано их практическое применение в виде модификаторов поверхности стекловолокон, пригодных для условий Арктики. Новизной работы является простота реализации макета установки по сравнению с установкой Luong et al. [5], что обусловлено использованием относительно дешевых компонентов при сборке, а также низкими температурой и энергией проведения процесса.

Материалы и методы

Для проведения процесса быстрого джоулевого нагрева был разработан модифицированный макет установки, описание которой приведено в работе [5]. В частности, были изменены электрическая схема (рис. 1), система управления и заменены на отечественные аналоги некоторые элементы установки. Конденсаторный блок емкостью 32 мФ (16 конденсаторов по 2000 мкФ) заряжался в течение 3 мин через автотрансформатор (ЛАТР) до значений 200 В. В качестве исходного материала использован измельченный до порошкообразного состояния полипропилен (ПП), смешанный с техническим углеродом (ТУ) (N550, «НТЦ РТИ и полимеров», Россия) в соотношении 1:1. Полученный порошок помещался в кварцевую трубку между двумя медными контактами, сопротивление между которыми составляло ~10 Ом. Разряд между контактами осуществлялся через согласующий индуктор номиналом 24 мГн. При такой индуктивности время нарастания тока через образец сопротивлением 0,1 Ом возрастает до миллисекунд и более. Измерения показали, что длительность процесса разряда конденсаторов составляет до 32 мс, при этом температура в реакционной камере достигает 2200 °С. Быстрый джоулев нагрев проходил в кварцевой трубке

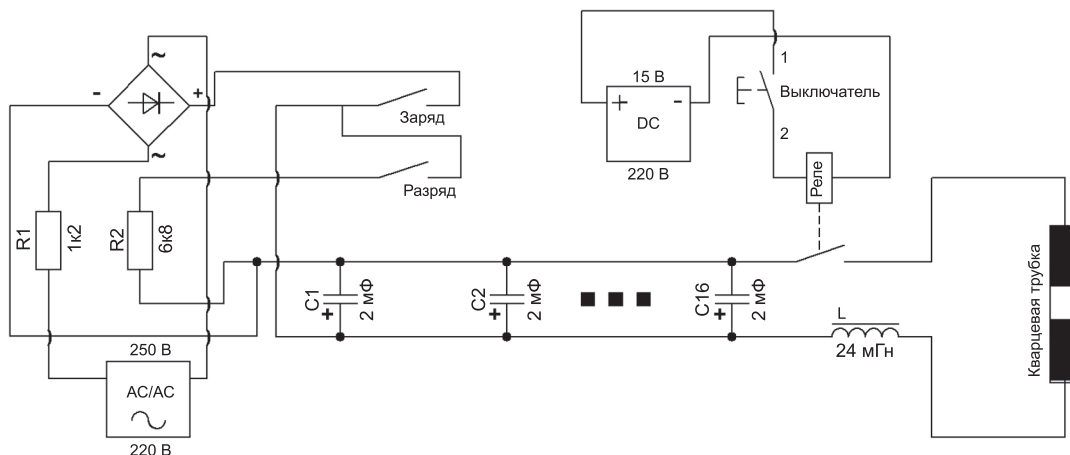


Рис. 1. Принципиальная монтажная схема макета установки

Fig. 1. Schematic diagram of the installation layout

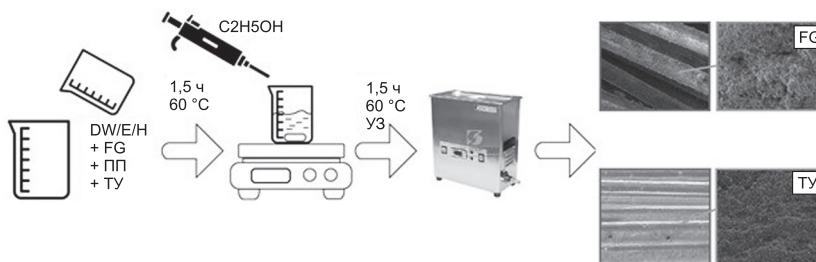


Рис. 2. Схематическое изображение процесса приготовления пропиточного состава, пропитки, покрытия на волокне (во вставке: FG – фГ)

Fig. 2. Schematic illustration of the procedure for preparation of the impregnation composition, the impregnation process, the coating on fiber (as indicated in the insert: FG – fG)

с порошком, которая находится внутри вакуумной камеры при пониженном атмосферном давлении (около 30 кПа). При массе углеродного образца 1 г батарея конденсаторов емкостью 32 мФ разряжается от 250 В до 50 В. Энергия, выделяемая на 1 г вещества, определяется формулой из [5]:

$$E = \frac{(U_1^2 - U_2^2) \times C}{2 \times m} \approx 3,2 \text{ кДж} \cdot \text{г}^{-1},$$

где U_1 и U_2 – напряжение до и после разряда, соответственно; C – емкость, m – масса на партию исследуемого вещества. Из полученного значения энергии синтеза была рассчитана расходуемая мощность установки, которая составила 0,00088 кВт·ч. По аналогии с работой [5], при пересчете на 1 т конвертируемого пластика в углеродный графенсодержащий порошок мощность составит ~880 кВт·ч/т. Принимая тариф на электроэнергию в г. Якутск, принятый 1 июля 2024 г., ~8,6 руб./кВт, стоимость карбонизации 1 т пластиковых отходов составит 7568 рубль. Для

сравнения, в работе [5] стоимость составила 10229,2 рубль по курсу доллара 97,5 руб.

Синтезированные из пластиковых отходов методом быстрого джоулевого нагрева углеродные порошки в работе далее обозначены как фГ. Полученными порошками в работе проведена химическая модификация поверхности стекловолокна марки ВМП (НПО «Стеклопластик», г. Солнечногорск, Россия). В качестве пропитывающего состава выбраны: коллоидная дисперсия эпоксидной смолы (Е), аминного отвердителя (Н), а также углеродных порошков (фГ, ТУ) в смеси деионизированной воды (DW) и этилового спирта (C_2H_5OH). Схема процесса представлена на рис. 2. Дисперсии приготовлены путем поочередного смешивания Е, Н, DW в отношениях 4 : 0,6 : 10 и 1 масс. % фГ, ТУ. Нанесение покрытия производилось путем погружения волокон в пропитывающий состав. Пропитку волокон с номинальным диаметром единичной нити 10 мкм прово-

дили при температуре 60 °С в течение 1,5 ч в ультразвуковой ванне («КРИСТАЛЛ-2,5», ОКБ «Кристалл», г. Йошкар-Ола, Россия).

Для проведения исследований привлечены методы спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) (NTegra Spectra, Зеленоград, Россия), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (JEOL 7800F, Япония), рентгеноэнергодисперсионной спектроскопии (РЭДС), микроскопии в ультрафиолетовом и ближнем ИК-диапазонах (Lambda 750s, Великобритания). Измерения температурных зависимостей вольт-амперных характеристик (ВАХ) стекловидных, функционализированных углеродными порошками, проведены двухзондовым методом на постоянном токе (ASEC-03, Зеленоград, Россия) от –1 до +1 В.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены результаты измерений УФ-спектров оптической плотности углеродного порошка, полученного методом быстрого джоулевого нагрева в интервале от 200 до 400 нм. Поглощение, вызванное углеродной связью $\pi-\pi^*$, локализованное в окрестности длин волн 230 нм, относится к вынужденным колебаниям, характерным для графитовых/графеновых структур [22]. Значения коэффициента оптической плотности резко падают (до 250 нм) и далее слабо увеличиваются в окрестности 275 нм, что характерно для связи типа $n-\pi^*$. С увеличением длины волны излучения источника (до 800 нм) интенсивность спектров оптической плотности убывает.

На рис. 4, а представлены спектры КРС порошков фГ и ТУ после джоулевого нагрева. Характерные для графитовых/графеновых структур D- и G-пики имеют максимумы при 1345 и 1596 см^{-1} [23, 24]. Как известно, основной пик D (локализация в районе 1350 см^{-1}) обусловлен наличием структурного разупорядочения (дефекты, границы доменов и др.) и его интенсивность зависит от количественного содержания sp^3 -атомов углерода [24]. Появление данного пика в спектрах КРС углеродных материалов обусловлено возбужденными электронами фононной симметрии A_{1g} . Также имеет место упругое рассеяние электронов на дефектах [25]. В идеальном графите или графене D-пик обычно отсутствует [23]. Известно, что появление очерченного и узкого G-пика в углеродных структурах (локализация в районе 1580–1600 см^{-1}) связано с рассеянием на фононах E_{2g} , а также присутствием гексагональной решетки графена/графита [23]. Бо-

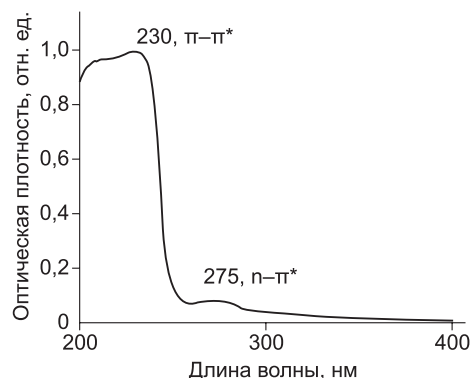


Рис. 3. Зависимости нормированной оптической плотности углеродного порошка, полученного методом быстрого джоулевого нагрева

Fig. 3. Dependencies of the normalized optical density of carbon powder produced via the fast Joule heating method

лее того, интенсивность данной линии указывает на количественное содержание sp^2 -гибридизированных атомов углерода. Смещение полосы в более высокие энергии говорит о разупорядочении кристаллической решетки графита/графена [24]. Как видно из рис. 4, а, для ТУ D-пик имеет смещение максимума на $\sim 25 \text{ см}^{-1}$ в сторону меньших частот и G-пика на 26 см^{-1} в сторону больших частот от значений графита/графена. Также не наблюдаются обертоны, характерные для углеродного материала с кристаллизацией [24]. Для фГ эти смещения составляют 5 и 16 см^{-1} соответственно. Кроме того, наблюдается уменьшение значения отношения интегральных интенсивностей пиков D- и G-пигов (I_D/I_G) до 1,5 для фГ. Все это свидетельствует об упорядочении кристаллической решетки и изменении отношения sp^3/sp^2 . Из отношения I_D/I_G для фГ порошка были оценены размеры графеновых доменов (L_a) в частицах порошка по методике, описанной в [26]. Определено, что L_a составляют примерно 13 нм. Таким образом, изменение отношения sp^3/sp^2 может быть обусловлено увеличением размеров sp^2 -кристаллитов, формирующих графеновые домены. Стоит отметить, для ТУ значения I_D/I_G составили 3,8–4,5, что свидетельствует об отсутствии кристаллизации в соответствии с траекторией аморфизации-графитизации Феррари и Робертсона [11].

Полосы, наименее интенсивные по сравнению с основными пиками углеродных наноматериалов, с максимумами, локализованными в районе от 2700 и 2900 см^{-1} , называют 2D, D+G соответственно [23]. Суммарно они также связаны

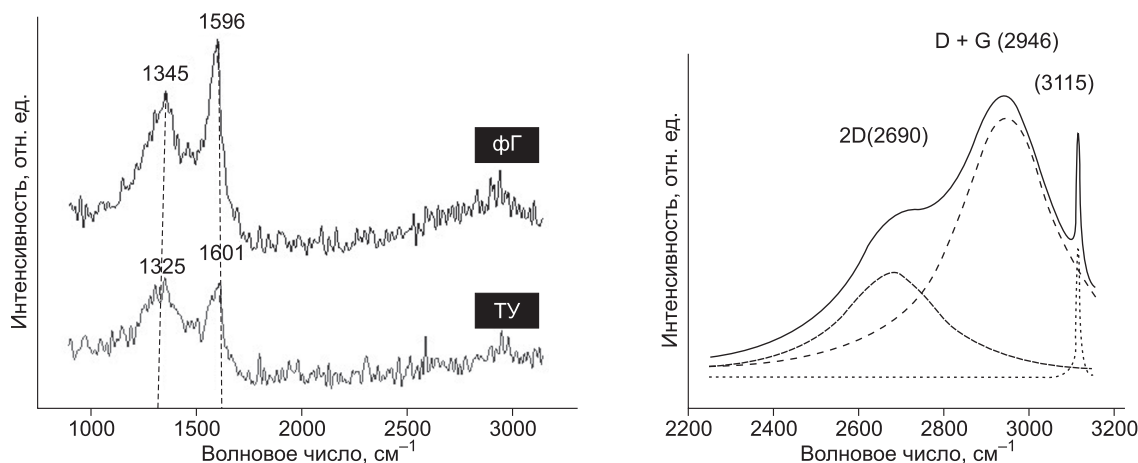


Рис. 4. Спектры КРС технического углерода (ТУ) и углеродного порошка, полученного методом быстрого джоулевого нагрева (фГ) (а) и разложение обертонов 2D и D+G на лоренцианы (б)

Fig. 4. a) Raman spectra of initial carbon black (CB) and produced via fast Joule heating carbon powder (fG); б) Deconvolution of the overtones of the 2D and D+G bands

с двухфононными рассеяниями, которые обусловлены дефектами в структуре. В представленных спектрах КРС фГ имеется полоса люминесценции в окрестностях длин волн 2690 и 3150 см^{-1} . Стоит отметить, что спектры КРС исходных ПП не содержат данных пиков и являются полностью аморфными. Разложение вышеуказанной полосы на лоренцианы указывает на наличие обертонов 2D- и D+G-пиков при 2690, 2946 см^{-1} соответственно (рис. 4, б). Пик при 3115 см^{-1} соответствует колебаниям ароматического кольца классов соединений C–H [27].

На рис. 5, а приведено СЭМ-изображение углеродного порошка, полученного методом быстрого джоулевого нагрева. Стоит отметить, что исходное СЭМ-изображение прекурсора из полипропилена и технического угля представляло собой ровную и однородную поверхность с мелкими вкраплениями. Из рисунка видно, что воздействие быстрым джоулевым нагревом на смесь приводит к значительному изменению морфологии поверхности. Видны вкрапления мелких частиц размерами до 10 мкм, образующих плотные пористые участки.

Проведенный элементный анализ показал отношение атомов углерода к кислороду как 10:1, что говорит об успешной графитизации исходного прекурсора. Стоит отметить, что данный метод РЭДС не позволяет обнаружить атомы водорода.

Результаты измерений методом СЭМ и элементного анализа исходного углеродного волокна и волокон, пропитанных фГ и ТУ, показаны на рис. 5. Из сравнения изображений поверхно-

сти волокон, представленных на рис. 5, в и г, следует, что более равномерное покрытие на стекловолкне формируется для образца, модифицированного фГ (см. рис. 5, в). Анализ химического состава исходного волокна показал наличие как углерода и кислорода, так и широкого класса других элементов (Si, Al, Mg) (вставка рис. 5, а). Для волокна с ТУ присутствуют соединения с кислородом (вставка рис. 5, г) в соотношении 4:1. Для фГ отмечено присутствие только углерода (вставка рис. 5, в).

Из температурных зависимостей ВАХ волокон, пропитанных фГ и ТУ, была проведена оценка сопротивлений (R) на 1 см^2 поверхности ($1 \times 1 \text{ см}$) образцов при низких температурах (200 К). Измерения показали, что сопротивление стекловолкна с ТУ составляет около 80 МОм/кв., в то время как для фГ это значение было на порядок ниже (5–8 МОм/кв.). Следует отметить, что исходное стекловолкно являлось изолятором с сопротивлением более 100 МОм/кв. Относительно низкое значение R в пропитанном фГ стекловолкне, возможно, связано с наличием sp^2 -кристаллитов. В то же время, высокое сопротивление может быть вызвано низкой мощностью разряда (3,2 кДж/г) по сравнению с использованными в работе [5] значениями – порядка 7,2 кДж/г. В дальнейшем для повышения электропроводности потребуется увеличить мощность разряда.

Известно из работы [5], что при быстром джоулевым нагреве пластиковых отходов формируются два вида графеновых продуктов: турбо-

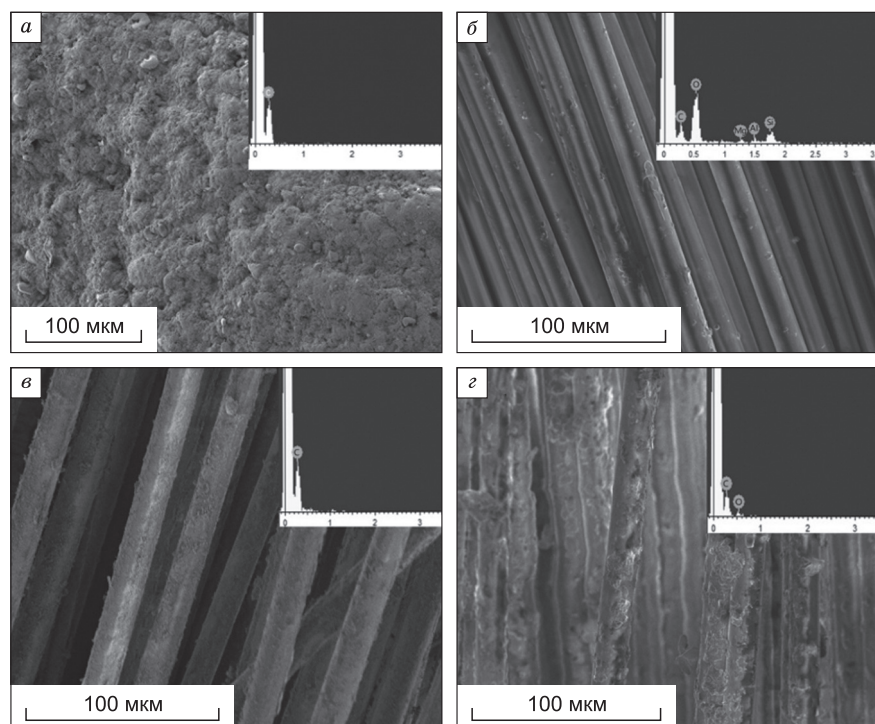


Рис. 5. СЭМ-изображения: а – углеродного порошка; б – исходного волокна; в – покрытия фГ на волокне; г – покрытия ТУ на волокне

Fig. 5. SEM images display: a) carbon powder; б) source fiber; в) fG coating; г) CB coating on the fiber

стратный графен и листы сморщенного графена, на что указывают пики TS_1 , TS_2 в спектрах КРС, локализованные в областях частот $1800\text{--}2100\text{ см}^{-1}$. Полученные в данной работе углеродные графен-содержащие порошки не имеют данных пиков в представленных спектрах КРС. Это может объясняться недостаточной мощностью разряда ($3,2\text{ кДж/г}$) для получения турбостратного графена.

Тем не менее, из спектров оптической плотности в УФ-диапазоне и КРС следует, что в полученных углеродных порошках присутствуют графеновые чешуйки с латеральными размерами до 13 нм . Быстрая графитизация и образование sp^2 -гибридизированных участков углерода объясняется механизмом протекания теплового удара при быстром джоулевым нагреве, при котором разупорядоченные атомы С в состоянии sp^3 -гибридизации претерпевают изменение структуры с преобладанием sp^2 -гибридизированных фаз углерода, исходя из данных КРС. При классической термообработке, подразумевающей длительное термическое воздействие, характерно и длительное охлаждение. Долгий процесс засты-

вания приводит к изменению структуры за счет слияния мелких частиц графеновых чешуек. Результатом длительного застывания может являться дезориентация кристаллической решетки структуры с последующим переходом в неупорядоченную кристаллическую с повышенным содержанием sp^3 -гибридизированной фазы углерода. Используемая в работе методика позволяет снизить вероятность образования хаотичной структуры за счет короткого по длительности (32 мс) протекания локального нагрева, а также быстрому охлаждению после теплового удара. Таким образом, присутствие графеновых чешуек в полученных углеродных порошках может объясняться данным механизмом. Наблюдаемая электрическая проводимость в модифицированных фГ стекловолокнах при низких температурах, вероятно, связана с туннелированием через кулоновский потенциальный барьер носителей заряда.

Пропитывающий состав фГ, как показали результаты СЭМ, обеспечивает более равномерное покрытие, а также не влечет за собой разрушение структуры исходного стекловолокна, харак-

терного для состава с ТУ. Это, по-видимому, связано с наличием большого количества графеновых чешуек в полученных углеродных порошках, которые, по сравнению с частицами технического угля, легко диспергируются. Более крупные частицы, которые характерны для ТУ, могут не внедриться из-за диаметра поперечного сечения волокна, которое составляет от единиц до десятков микрон.

Заключение

В работе методом быстрого джоулевого нагрева на разработанном макете установки получены углеродные графенсодержащие порошки из отходов полипропилена, смешанного в пропорции 1:1 с техническим углеродом. Исследования спектров КРС показали, что в полученных графенсодержащих порошках интенсивность G-пика возрастает относительно D-пика и проявляются двухфонные 2D- и D+G-полосы. Это указывает на большую упорядоченность структуры фГ за счет появления графеновых чешуек. Оценка размеров графеновых доменов, полученных из отношения интегральных интенсивностей D- и G-пику, показала, что они составляют до 13 нм. Результаты измерений спектров оптической плотности подтверждают наличие графеновых чешуек, локализованных в окрестностях длин волн 230 и 275 нм.

Модификация поверхности стекловолокна марки ВМП пропитывающим составом с синтезированными углеродными порошками (фГ) показала более равномерное покрытие по сравнению с техническим углем. Из температурных зависимостей ВАХ пропитанных фГ стекловолокон были установлены сопротивления 5–8 МОм/кв. при температурах –73 °С. Проводимость может быть повышена за счет повышения мощности разряда. Разработанный макет установки быстрого джоулевого нагрева имеет перспективу внедрения в область переработки пластиковых отходов. Также стекловолокна, модифицированные полученными углеродными порошками, могут стать основой для применения в качестве создания «умного» стеклофибробетона в условиях Арктики.

Список литературы / References

1. Aslan N. Structural, photovoltaic and optoelectronic properties of graphene–amorphous carbon nanocomposite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32(12):16927–16936. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06254-1>

2. Bezzon V.D.N., Montanheiro T.L.A., de Menezes B.R.C., et al. Carbon nanostructure-based sensors: a brief review on recent advances. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019;2019:4293073. <https://doi.org/10.1155/2019/4293073>

3. Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Охупкин А.И. и др. Анализ углеродсодержащих материалов методом вторично-ионной масс-спектрометрии: содержание атомов углерода в sp^2 - и sp^3 -гибридных состояниях. *Письма в Журнал технической физики*. 2020;46(6):38–42. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.06.49164.18151>

Drozdv M.N., Drozdov Y.N., Okhapkin A.I., et al. SIMS analysis of carbon-containing materials: content of carbon atoms in sp^2 and sp^3 hybridization states. *Technical Physics Letters*. 2020;46:290–294. <https://doi.org/10.1134/S1063785020030190>

4. Mbayachi V.B., Ngayiragije E., Sammani T., et al. Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. *Results in Chemistry*. 2021;3:100163. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100163>

5. Luong D.X., Bets K.V., Algozeeb W.A., et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*. 2020;577(7792):647–651. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1938-0>

6. Wang J., Ren Zh., Hou Y., et al. A review of graphene synthesis at low temperatures by CVD methods. *New Carbon Materials*. 2020;35(3):193–208. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(20\)60484-X](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(20)60484-X)

7. De Silva K.K.H., Huang H.H., Joshi R., et al. Restoration of the graphitic structure by defect repair during the thermal reduction of graphene oxide. *Carbon*. 2020;166:74–90. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.05.015>

8. Chamoli P., Banerjee S., Raina K.K., et al. Characteristics of graphene/reduced graphene oxide. In: Kar K. (ed.) *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I: Characteristics*. Springer Series in Materials Science, vol. 300. Springer, Cham. 2020, pp. 155–177. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43009-2_5

9. Иванов-Омский В.И., Лодыгин А.Б., Ястребов С.Г. Сканирующие туннельные микроскопия и спектроскопия аморфного углерода: Обзор. *Физика и техника полупроводников*. 2000;34(12):1409–1416.

Ivanov-Omskiy V.I., Lodygin A.B., Yastrebov S.G. Scanning tunnelling microscopy and spectroscopy of amorphous carbon. *Fizika i Tehnika Poluprovodnikov*. 2000;34(12):1409–1416. (In Russ.)

10. Ferrari A.C., Kleinsorge B., Morrison N., et al. Stress reduction and bond stability during thermal annealing of tetrahedral amorphous carbon. *Journal of Applied Physics*. 1999;85(10):7191–7197. <https://doi.org/10.1063/1.370531>

11. Ferrari A.C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*. 2000;61(20):14095. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>

12. Рустамова Е.Г., Губин С.П. Композиты графен–полиэтилен высокого давления и их свойства. *Радио-*

электроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2021;13(3):369–376.

Rustamova E.G., Gubin S.P. Graphene-polyethylene high pressure composites and their properties. *Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii*. 2021; 13(3):369–376. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.10.038665>

13. Chen J., Jia C., Wan Z. Novel hybrid nanocomposite based on poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)/multiwalled carbon nanotubes/graphene as electrode material for supercapacitor. *Synthetic Metals*. 2014;189:69–76. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2014.01.001>

14. Liu Z., Qian Z., Song J., et al Conducting and stretchable composites using sandwiched graphene-carbon nanotube hybrids and styrene-butadiene rubber. *Carbon*. 2019;149:181–189. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.037>

15. Feng J., Dong L., Li D., et al. Hierarchically stacked reduced graphene oxide/carbon nanotubes for as high performance anode for sodium-ion batteries. *Electrochimica Acta*. 2019;302:65–70. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.008>

16. Pham K.C., McPhail D.S., Mattevi C., et al. Graphene-carbon nanotube hybrids as robust catalyst supports in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*. 2016;163(3):255. <https://doi.org/10.1149/2.0891603jes>

17. Dilfi K.F.A., Che Z., Xian G. Grafting ramie fiber with carbon nanotube and its effect on the mechanical and interfacial properties of ramie/epoxy composites. *Journal of Natural Fibers*. 2019;16(3):388–403. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1423259>

18. Wang W., Xian G., Li H. Surface modification of ramie fibers with silanized CNTs through a simple spray-coating method. *Cellulose*. 2019;26:8165–8178. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02663-y>

19. Столяренко В.И., Ольшанский В.И. Физические методы модификации структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе стеклоткани. *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия Строительство. Электротехника и химические технологии*. 2022; 14(2):74–85. <https://doi.org/10.46573/2658-7459-2022-2-74-85>

Stolyarenko V.I., Olshansky V.I. Physical methods for modifying the structure and properties of polymer composite materials based on glass fiber. *Vestnik of Tver State Technical University. Series "Building. Electrical engi-*

neering and chemical technology". 2022;2(14):74–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.46573/2658-7459-2022-2-74-85>.

20. Бахолдин Д. Г. Применение композитных материалов в строительстве. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2024;5-1(92): 189–192. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-5-1-189-192>.

Bakholdin D.G. The use of composite materials in construction. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;5-1(92):189–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-5-1-189-192>.

21. Jahromi S.G. Effect of carbon nanofiber on mechanical behavior of asphalt concrete. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2015;6(2):57–66.

22. Nair R.R., Blake P., Grigorenko A.N. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*. 2008;320(5881):1308–1308. <https://doi.org/10.1126/science.1156965>

23. Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2004;362(1824):2477–2512. <https://doi.org/10.1098/rsta.2004.1452>

24. Sheka E.F., Golubev Y.A., Popova N.A. Graphene domain signature of Raman spectra of sp² amorphous carbons. *Nanomaterials*. 2020;10(10):2021.

25. Савватимский А.И., Онуфриев С.В. Исследование физических свойств углерода при высоких температурах (по материалам экспериментальных работ). *Успехи физических наук*. 2020;190(10):1085–1108. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.10.038665>

Savvatimskii A. I., Onufriev S. V. Investigation of the physical properties of carbon under high temperatures (experimental studies). *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2020;63(10):1015.

26. Cançado L.G., Takai K., Enoki T., et al. General equation for the determination of the crystallite size La of nanographite by Raman spectroscopy. *Applied Physics Letters*. 2006;88(16):163106. <https://doi.org/10.1063/1.2196057>.

27. Acik M., Lee G., Mattevi C., et al. The role of oxygen during thermal reduction of graphene oxide studied by infrared absorption spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2011;115(40):19761–19781. <https://doi.org/10.1021/jp2052618>

Об авторах

ПРОКОПЬЕВ, Айсен Русланович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Академия наук РС(Я); старший научный сотрудник, СВФУ, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, ResearcherID: AFG-0633-2022, Scopus Author ID: 57200722270, SPIN: 7047-8695, e-mail: aisenprokopiev@mail.ru

ВАСИЛЬЕВА, Елена Дмитриевна, инженер, Академия наук РС(Я); инженер, СВФУ, <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>, ResearcherID: ACN-5974-2022, Scopus Author ID: 58179742200, SPIN: 1630-3117, e-mail: vasilyeva_edm@mail.ru

А. Р. Прокопьев и др. • Получение быстрым джоулевым нагревом углеродных графенсодержащих порошков...

ЛОСКИН, Николай Николаевич, лаборант-исследователь, Академия наук РС(Я); лаборант, СВФУ, <https://orcid.org/0000-0002-9514-8408>, ResearcherID: НКО-8689-2023, Scopus Author ID: 58880184400, SPIN: 2178-6822, e-mail: loskin.origin99@gmail.com

ПОПОВ, Дмитрий Николаевич, лаборант-исследователь, Академия наук РС(Я); лаборант, СВФУ, <https://orcid.org/0000-0001-9639-7601>, ResearcherID: НКО-8669-2023, Scopus Author ID: 58879397600, e-mail: dmiitryy09@gmail.com

Вклад авторов

Прокопьев А.Р. – разработка концепции, методология, проведение исследования, редактирование рукописи, руководство исследованием; **Васильева Е.Д.** – разработка концепции, методология, проведение исследования; **Лоскин Н.Н.** – проведение исследования, редактирование рукописи; **Попов Д.Н.** – проведение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

PROKOPEV, Aisen Ruslanovich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia); Senior Researcher, NEFU, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, ResearcherID: AFG-0633-2022, Scopus Author ID: 57200722270, SPIN: 7047-8695, e-mail: aisenprokopiev@mail.ru

VASILIEVA, Elena Dmitrievna, Engineer, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia); Engineer, NEFU, <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>, ResearcherID: ACN-5974-2022, Scopus Author ID: 58179742200, SPIN: 1630-3117, e-mail: vasilyeva_edm@mail.ru

LOSKIN, Nikolay Nikolaevich, Laboratory Research Assistant, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia); Laboratory Assistant, NEFU, <https://orcid.org/0000-0002-9514-8408>, ResearcherID: НКО-8689-2023, Scopus Author ID: 58880184400, SPIN: 2178-6822, e-mail: loskin.origin99@gmail.com

POPOV, Dmitrii Nikolaevich, Laboratory Research Assistant, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia); Laboratory Assistant, NEFU, <https://orcid.org/0000-0001-9639-7601>, ResearcherID: НКО-8669-2023, Scopus Author ID: 58879397600, e-mail: dmiitryy09@gmail.com

Authors' contribution

Prokopev A.R. – conceptualization, methodology, investigation, writing – review & editing, supervision; **Vasilieva E.D.** – conceptualization, methodology, investigation; **Loskin N.N.** – investigation, writing – review & editing; **Popov D.N.** – investigation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 19.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 11.11.2024

Принята к публикации / Accepted 15.11.2024